



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

펠라고늄 씨앗 까끄라기의 나선형
습윤 변형 연구

Helical morphing of hygroresponsive awns of
Pelargonium

2019년 8월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

최 성 목

국 문 초 록

나선 구조의 까끄라기를 가지는 *Pelargonium Appendiculatum* 씨앗은 스스로 땅을 파서 자생할 수 있는 식물 중 하나이다. 세포벽에서의 단방향 흡습 팽창이 내부 구조의 배열 상태에 의해 까끄라기는 주변의 습도에 따라 나선형으로 꼬이게 된다. 그리고 이를 이용하여 씨앗의 모 식물에서 멀리 퍼트릴 수 있다. 씨앗이 땅에 안착한 후엔 낮과 밤 사이의 습도 차이를 이용하여 분화하기 충분한 깊이만큼 스스로 땅을 파는데, 이때 나선형 변형을 이용하여 흙에서의 저항을 줄인다. 식물 세포 내의 흡습 변형에 대한 다양한 연구가 이뤄지고 있으나 *Pelargonium Appendiculatum* 씨앗 까끄라기의 나선형 변형에 관해서는 명확히 알려지지 않았다. 본 연구에서는 *Pelargonium Appendiculatum* 씨앗 까끄라기 내부 구조를 분석하였다. 이 분석을 토대로 까끄라기의 변형을 간단한 수학 모델로 나타내기 위해 세포 배열구조를 간단한 판 구조라 가정한 후 모델링 하였고, 이를 실제 모델과 비교하여 잘 맞음을 확인하였다. 또한, 우리는 식물 운동을 모방하기 위해 전기 방사(electrospinning)를 이용하여 흡습성 나선변형 액추에이터를 제조한 후 실제 까끄라기의 변형과 비슷한 변형이 일어남을 확인하였다.

주요어: 흡습 변형 세포, 나선형 변형, *Pelargonium seed awn*

학 번: 2014-21851

목 차

국문초록	i
목차	ii
List of Figures	iv
List of Tables	vi
1. 서론	1
2. Pelargonium 까끄라기의 물성	3
2.1 까끄라기 흡습 변형률	3
2.2 Pelargonium 까끄라기 구조	4
2.3 식물 구성성분의 물성치	6
3. 이론적 모델링	8
4. 나선 액추에이터	15
4.1 나선 액추에이터 제작	15
4.2 나선 액추에이터 분석	18
5. 이론과 나선 액추에이터 비교	19
6. 결론	21

참고문헌	22
Abstract (영문초록)	25

List of figures

Fig. 2.1	Schematic of capillary rise experimental setup.	3
Fig. 2.2	SEM image of the cross-section of the awn.	4
Fig. 2.3	Schematics of the awn composed of inactive layer and active layer.	5
Fig. 2.4	The simplified model of the awn structures decomposed of tri-layer.	5
Fig. 3.1	Laminated plate model. (a) Schematics of the tri-layer plates (b) Orientation of the properties of anisotropic materials. Numbers 1 and 2 correspond to material coordinates. Red arrows of the first active layer indicates the expansion direction. (b) Geometry of helix.	14
Fig. 3.2	Comparison between theoretical modeling and experimental measurements of the awns for various RH.	14
Fig. 4.1	Experimental apparatus to large-scaled directional electrospinning. Electrospun nanofibers deposited to the rotational collector in a solid phase.	16
Fig. 4.2	Bilayer structure composed of inactive and active layers. The angle ψ corresponds to the cutting direction of the bilayer.	16
Fig. 4.3	Helical motion of the hygroscopic actuator with $\psi = 45^\circ$. RH is	

	increasing from left to right.	17
Fig. 4.4	ESEM images of the top view of the active layer. The fibers start to expand in fiber direction when the RH exceeds 40%. White dashed triangle indicates anisotropic areal expansion. Scale bar, 10 μm	18
Fig. 5.1	Comparison between the actuators (top) and numerical simulation (bottom). Inset: Coordinates of the parametric curves of the helix.	20
Fig. 5.2	Dimensionless length P/R of the actuators versus ψ . Inset: The characteristics of helix geometry.	20

List of tables

Table 1	Young's modulus and Poisson's ratio of materials.	7
Table 2	Composition of the cellulose and lignin	7
Table 3	Elastic modulus of <i>Pelargonium</i> awns	7

1. 서론

동물과는 다르게 식물의 운동은 흡습 변형(hygroscopic deformation)이라 불리는 대부분 물 수송과 식물 내부 구조 사이의 상호작용을 통해 일어난다. 흡습 변형은 오로지 세포 내부의 수분에 따른 팽창 때문에 일어나므로 식물의 죽은 조직에서도 성공적으로 작동한다. [1, 2] 비록 식물변형의 메커니즘은 근육세포를 이용하는 동물에 비해 간단하지만, 이를 이용하는 식물의 생존 전략은 동물만큼이나 우아하며, 뛰어난 전략이다. 예를 들어, 식충 식물 중 하나인 *Venus Flytrap*의 경우 buckling instability를 이용하여 빠르게 곤충을 잡아먹는다. [3] *Venus Flytrap* 외에도 흡습성 식물 운동은 포식 활동 외에도 번식 및 종자 분산에도 활용된다. 종자 분산은 일반적으로 조류 등의 동물을 이용하는 방법이나 바람을 이용하는 등의 수동적 방법[4]으로 제한되지만, 일부 식물은 흡습 변형을 이용하여 위 효과들을 극대화해 종자 분산이 더욱 잘 일어나도록 유도한다. *Pelargonium*과 같은 쥐손풀이 과에 속하는 *Erodium cicutarium* 씨앗은 씨앗 까끄라기의 흡습 변형 에너지를 저장하다 그 에너지가 한계치를 넘기면 이 에너지를 운동 에너지로 변형시켜 폭발적으로 날아갈 수 있게 하여 씨앗을 멀리 전파한다. [5] *Pelargonium Appendiculatum* 또한 씨앗 분화 과정에 흡습 변형을 이용한다. 씨앗 까끄라기를 나선형 변형이 일어남에 따라 씨앗 머리가 드릴과 같이 땅을 파고 들어가게 하는데, 이런 coiling 운동은 씨앗 머리와 토양 사이의 저항을 감소시켜 땅을 쉽게 뚫고 들어갈 수 있게 해준다. [6, 7]

흡습 변형을 보이는 식물 세포들의 세포벽은 흡습 변형률이 매우 적은 셀룰로오스 섬유(cellulose nanofiber)와 팽창정도가 비교적 큰 리그닌(lignin) 등의 물질로 이루어져 있다. 식물 세포에서 일어나는 흡습 변형은

이 두 물질이 큰 역할을 수행한다. 흡습 변형이 적은 셀룰로오스 섬유가 세포 외곽의 세포벽에 섬유 형태로 분포되어있는데, 흡습 변형정도가 적은 세포에선 셀룰로오스 미세 섬유가 방향성을 띄지 않고 랜덤하게 분포되어 있는 반면, 변형률이 큰 세포에서는 일정한 각도로 셀룰로오스 섬유들이 나선형으로 감겨져 있다. 세포내부의 특징 뿐 아니라 세포 배열구조 또한 식물 변형에 큰 역할을 수행한다. 굽힘 운동이 일어나는 식물들은 대부분 변형률이 큰 세포들로 이루어진 활성층과 그에 반해 변형률이 작은 세포들로 이루어진 비 활성층이 서로 접합되어있다. 이때, 식물 주변의 습도가 달라진다면 한 층은 큰 변형이 일어나는 반면, 다른 층은 적은 변형이 일어나 두 층 사이에 스트레인 불일치가 일어나게 되며, 이 스트레인 불일치를 완화시키기 위해 굽힘 변형이 일어나게 된다. *Pelargonium* 씨앗 까끄라기 세포 또한 이런 특징을 가지고 있다. *Pelargonium*의 까끄라기 또한 구조적 특성이 다른 두 층이 접합되어 있는데, 흡습 과정동안 변형은 다른 식물과 다르게 단순 굽힘 운동이 아닌 나선형 변형이 일어나게 된다. [8-11] *Pelargonium* 까끄라기의 나선형 변형을 이해하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔었다. 세포단위에서의 연구를 통해 *Pelargonium* 씨앗을 감고 있는 셀룰로오스 섬유는 단순 나선 구조가 아닌 기울어진 나선 구조를 이룬다는 것을 알아내었다. [12] 하지만 전체 구조의 변형을 완벽하게 이해하기 위해선 세포단위의 구조 이해 뿐 아니라 세포 집합체의 구조 또한 충분히 이해하여야 한다. 본 연구에서는 까끄라기 전체 구조에 대한 모델링을 통해 나선형 변형을 간단한 수식으로 표현하여 식물의 나선형 변형을 좀 더 이해하고자 노력하였고, 위 모델링을 토대로 흡습 나노섬유로 이루어진 나선형 액추에이터를 개발하고자 한다.

2. *Pelargonium* 까끄라기의 물성

2.1 까끄라기 흡습 변형률

까끄라기의 나선변형 과정을 관찰하기 위해, 일정 온도에서 습도를 변형 가능한 항온 항습기 (TH500, 우진 테크 엔진) 내부에 슬라이드 유리에 고정된 *Pelargonium Appendiculatum* 씨앗을 배치하였다. 상대 습도(RH)가 증가함에 따라 비활성 층의 제약하에서 활성층의 방향성 팽창으로 인해 까끄라기의 굽힘이 Fig. 2.1과 같이 풀리고 있음을 확인하였다. RH가 줄어들면 씨앗 까끄라기는 원래 모양으로 정확히 되돌아가므로 이는 가역 과정으로 볼 수 있다. 씨앗에 따라 나선형 모양이 약간씩 다르지만, RH=50%인 경우 10개의 씨앗에 대해 나선형 까끄라기의 나선반경 R과 피치(Pitch) P는 평균적으로 각각 0.5mm 및 1.9mm 정도였다.

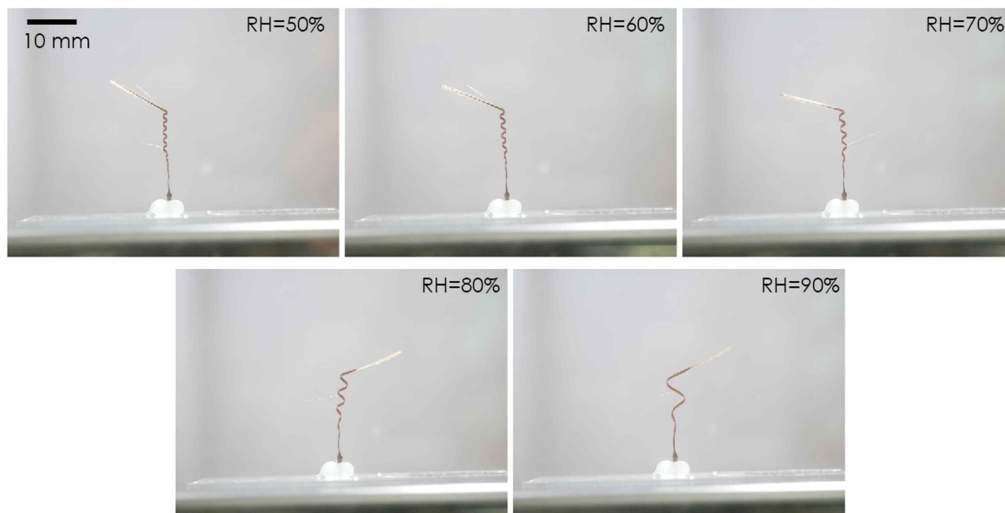


Fig. 2.1 Schematic of capillary rise experimental setup.

2.2 *Pelargonium* 까끄라기 구조

까끄라기의 나선형 변형을 이해하기 위해선 구조를 먼저 해석해야한다. Fig. 2.2는 까끄라기가 셀룰로오스에 의해 감긴 다수의 셀로 배열된 활성층 및 비 활성층으로 구성됨을 보여준다. 여기서, 식물 세포의 장축과 나선형으로 감긴 셀룰로오스 미세 섬유 방향 사이를 미세 섬유 각도(MFA)라고 하는 각도 θ 로 정의한다 [13]. 세포의 팽창 방향은 변형률이 주변 세포 성분과 비교하면 극도로 적은 셀룰로오스 섬유의 제약으로 인해 섬유 방향에 수직 방향으로 주로 팽창을 하게 된다. Fig. 2.3와 같이 세포 중심을 따라 잘라보면 두 면에 감겨 있는 셀룰로오스 섬유의 MFA는 서로 다른 값을 가지게 된다. 이는 나선을 생각하면 당연한 결과이다. 세포의 중심을 따라 자르면서 생기는 두 층을 독립된 구조를 가지는 층으로 볼 수 있을 것이다. 따라서, 전체 까끄라기 구조는 분리된 활성층과 비 활성층, 이 세 층이 접합된 판으로 간단히 표현할 수 있을 것이다 (Fig. 2.4).

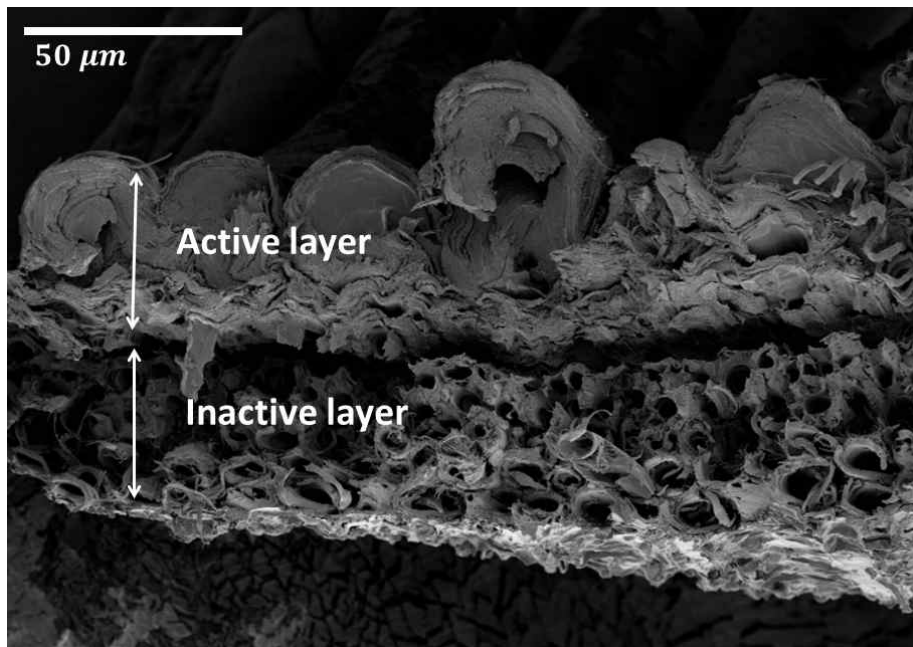


Fig. 2.2 SEM image of the cross-section of the awn

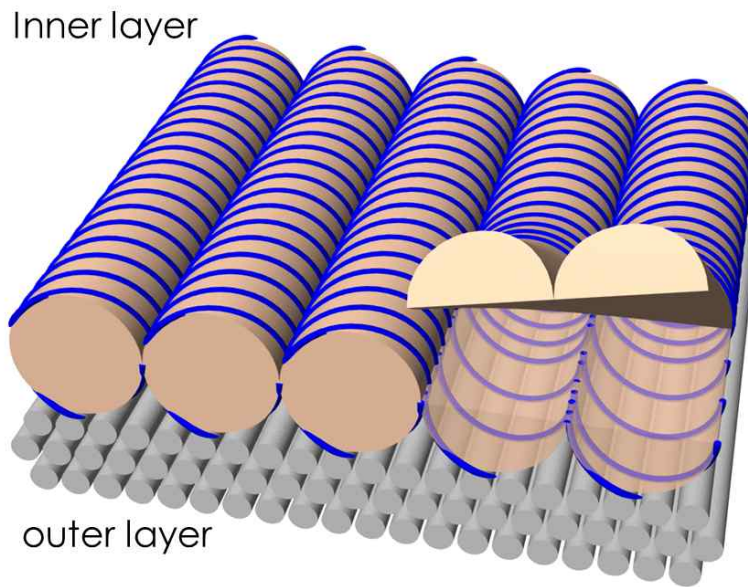


Fig. 2.3 Schematics of the awn composed of inactive layer and active layer.

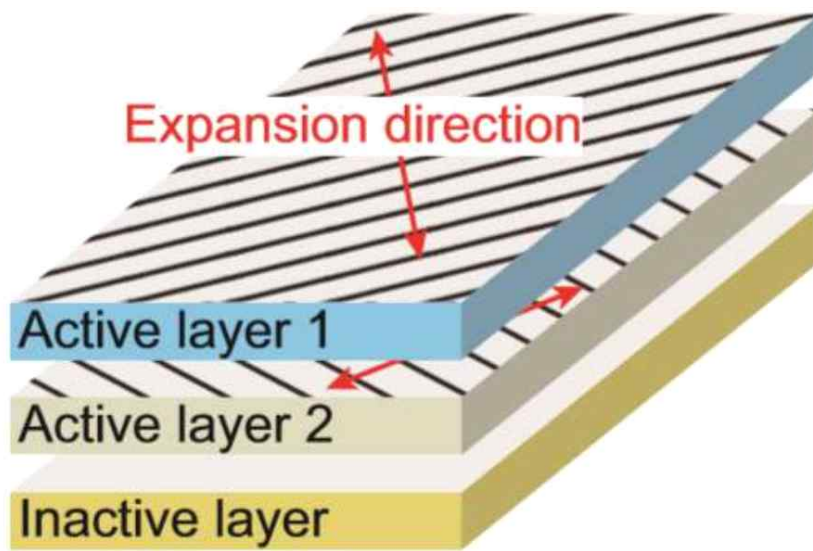


Fig. 2.4 The simplified model of the awn structures decomposed of tri-layer

2.3 식물 구성성분의 물성치

식물의 강성 행렬(stiffness matrix)을 구하기 위해선 영률과 푸아송 비를 알아야한다. 식물 세포는 여러 물질이 비등방적으로 혼합되어 있어, 정확한 강성 행렬을 구하는 것은 불가능하다. 따라서 식물 세포를 간단한 모델로 치환한 다음 해당 모델의 강성 행렬을 구하여 그 값을 토대로 결과를 근사적으로 유추할 수 있다. 세포벽은 셀룰로오스와 리그닌 등의 여러 물질로 구성되어있는데, 본 연구에서는 세포벽은 셀룰로오스와 리그닌 두 성분만으로 이루어져 있다고 가정하였다. 또한, 셀룰로오스는 섬유 형태로 세포벽을 일정한 각도를 유지한 채 나선형으로 감싸고 있다고 가정하고, 나머지 물질은 리그닌으로 이루어져있다고 가정하였다. 셀룰로오스와 리그닌의 강성 값은 Table. 1과 같다.[14] 또한, 식물 세포벽의 셀룰로오스와 리그닌의 구성비는 Table 2와 같다.[15]

셀룰로오스와 리그닌의 물성 값을 이용하여 식물 세포의 물성 값을 구해야 한다. 활성 층의 경우 벌크 속에 나노 섬유가 일정하게 배열되어 있을 때 전체 강성 값을 구하는 방법인 Mori-Tanaka 방식을 이용하면 된다. 비활성층은 나노 섬유의 배열이 랜덤으로 되어 있다고 가정하면 벌크로 간주할 수 있다. 세포의 주축방향의 영률을 E_{11} , 푸아송비를 ν_{12} , 수직방향의 영률은 E_{22} , 푸아송비는 ν_{21} 그리고 전단 탄성 계수를 G_{12} 라 정의하고 셀룰로오스 값과 리그닌 값을 이용하여 각 층의 탄성 계수를 구하면 Table3과 같다.

Table 1 Young's modulus and Poisson's ratio of materials.

	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio
Cellulos(iso)	110-170	0.04
Cellulos(iso)	134-319	0.04-0.1
Cellulos(iso)	16.4-37.3	0.0038-0.011
Lignin	2.5-4	0.30

Table 2 Composition of the cellulose and lignin.

	Cellulose(%w/w)	Lignin(%w/w)
Wood	40-50	20-30
Plant	60-70	2-6

Table 3 Elastic modulus of *Pelargonium* awns.

	Active layer	Outer layer
E_{11} (GPa)	135	100
E_{22} (GPa)	15	-
G_{12} (GPa)	125	-
ν_{12}	0.008	0.04
ν_{21}	0.07	-

3. 이론적 모델링

복층 구조물의 해석 전에, 우리는 까끄라기의 단순화된 모델인 접합 층 (laminated plate)에 수학적 기호를 정의하였다 (Fig. 3.1.a). Reference coordinate(x, y)에서 material coordinate(u, v)까지의 회전 각도는 각도 θ 로 나타낸다 (Fig. 3.1.b). 여기서, 우리는 나선형 변형이 일어난 리본을 구성하는 두 기하학적 파라미터인 반경 R 과 피치 P 를 Fig. 3.1.c와 같이 정의할 수 있다. 리본의 MFA $\bar{\theta}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다 : $\bar{\theta}_i = (-1)^{i+1}\theta - \psi$, 여기서 ψ 는 후술하겠지만 tilted angle로 정의한다. 앞의 기하학적 파라미터를 이용하여 laminated plate 이론을 기반으로 한 이론적 모델링하였다. Plate의 변형 경향은 전적으로 응력의 방향에 의존하며, 간단한 구성 관계는 $\sigma = \bar{D}\epsilon$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 σ , \bar{D} 및 ϵ 는 각각 응력, 재료 강성 및 총 변형률이다. Kirshchoff 가정에 의하면 전체 스트레인 ϵ 는 기준 플레인에서의 변형률 ϵ_0 및 곡률 κ 로 나타낼 수 있으며 ($\epsilon = \epsilon_0 + \kappa z$), 앞의 구성 관계 식에 대입하면 $\sigma = \bar{D}(\epsilon_0 + \kappa z)$ 가 된다. 판에 가해지는 힘 \mathbf{N} 및 모멘트 \mathbf{M} 의 행렬 방정식과 total strain 및 재료 특성 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

여기서 A, B 및 D 는 θ 에 따른 이방성 재료의 기계적 특성으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
A &= \sum_{k=1}^n \int_{z_k}^{z_{k+1}} dz = \sum \bar{D}(z_{k+1} - z_k) \\
B &= \sum_{k=1}^n \int_{z_k}^{z_{k+1}} z dz = \sum \bar{D}(z_{k+1}^2 - z_k^2) \\
D &= \sum_{k=1}^n \int_{z_k}^{z_{k+1}} z^2 dz = \sum \bar{D}(z_{k+1}^3 - z_k^3)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

까끄라기가 흡습 과정 동안 변하는 스트레인인 ϵ_ϕ 는 습도 ϕ 와 hygroscopic swelling coefficient인 α 의 곱으로 나타낼 수 있다($\epsilon_\phi = \alpha \phi$). 따라서 σ 에 의해 실제 리본에 형성되는 스트레인은 $\sigma = \bar{D}(\epsilon - \epsilon_\phi)$ 가 된다. 따라서 식 (3.1)은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \kappa \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \int \bar{D}\epsilon_0 dz \\ \int \bar{D}\epsilon_0 z dz \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

실제 리본에 가해지는 힘은 없다고 가정하면 위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{N} \\ \bar{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int \bar{D}\epsilon_0 dz \\ \int \bar{D}\epsilon_0 z dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \kappa \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

리본의 변형 형태를 알기 위해선 ϵ_0 와 κ 를 알아야 하는데, 이는 α 와 \bar{D} 가 주어졌다면, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \overline{N} \\ \overline{M} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

벡터 형태인 κ 를 2차 텐서인 b 로 나타내면 다음과 같다.

$$\kappa = \begin{Bmatrix} \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \rightarrow b_{xy} = \begin{bmatrix} \kappa_{xx} & \kappa_{xy} \\ \kappa_{xy} & \kappa_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

위 곡률 텐서를 주축 방향으로 회전시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_{xy} = \begin{bmatrix} \kappa_{xx} & \kappa_{xy} \\ \kappa_{xy} & \kappa_{yy} \end{bmatrix} \rightarrow b_{12} = \begin{bmatrix} \kappa_1 & 0 \\ 0 & \kappa_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

여기서 주축 행렬의 두 principal curvature인 κ_1 와 κ_2 의 곱은 Gaussian curvature(\mathbf{G})라고 알려져 있다. 이 \mathbf{G} 값에 따라 면의 형태가 결정되는데, 그 값이 양수이면 돔 형태로 되며, 음수이면 말안장 형태, 0이면 단순한 bending 형태가 된다.

위에서 구해진 까끄라기의 식은 에너지를 고려하지 않고 구한 해로, 1차원적인 Timoshenko's beam theory 문제의 경우 한 방향(u)만 고려하면 되기 때문에 위 방식을 그대로 사용해도 되지만, 2차원적 문제에선 평면에 수직인 끼리의 coupled된 영향도 고려해야 하므로 실제 결과와 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 정확한 해를 도출하기 위해선 두 방향(u, v)이 결합된 식을 이용하여 결과를 보정해 줘야 한다. 이는 까끄라기의 탄성 에너지 U 를 이용하면 간단히 해결할 수 있다. 위에서 구한 곡률과 스트레인을 각각 $\overline{\epsilon}$, $\overline{\kappa}$ 라 두고, 실제 평면의 스트레인과 곡률을 ϵ , κ 라 두자. 평면의

탄성에너지는 멤브레인 에너지 U_m 과 벤딩 에너지 U_b 의 합으로 나타낼 수 있는데, 벤딩에너지는 실제 스트레인 ϵ 과 $\bar{\epsilon}$ 의 차의 함수로 나타낼 수 있고, 멤브레인 에너지는 실제 곡률 κ 과 $\bar{\kappa}$ 의 차의 함수로 나타낼 수 있다. 이를 간단히 표현하면 식 (3.8)과 같다.

$$U = U_m + U_b$$

$$U_b \sim Eh f(\epsilon - \epsilon_0) \quad (3.8)$$

$$U_m \sim Eh^3 f(\kappa - \kappa_0)$$

$f(\epsilon - \epsilon_0) \sim (\kappa^2 w^2)^2$ 이고, $f(\kappa - \kappa_0) \sim (\kappa)^2$ 이므로, 두 에너지는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$U_b \sim Eh(\epsilon - \epsilon_0)^2 \sim h l w (\kappa^4 w^4) \sim h w^5 \quad (3.8)$$

$$U_m \sim Eh^3(\kappa - \kappa_0)^2 \sim h^3 l w (\kappa)^2 \sim h^3 w$$

만약 까끄라기의 폭이 충분히 크다면 벤딩 에너지가 멤브레인 에너지보다 크기 때문에 벤딩에너지가 주축이 될 것이고, 반대의 경우엔 멤브레인 에너지가 벤딩 에너지보다 큰 값을 가져 멤브레인 에너지가 전체 에너지를 대변할 것이다. 그런데 실제 형상은 언제나 에너지를 최소화하는 형태가 되려고 하므로, 폭이 충분히 큰 경우엔 벤딩에너지를 줄이기 위해 $\epsilon - \epsilon_0 \approx 0$ 이 되려 할 것이고, 폭이 좁은 경우엔 $\kappa - \kappa_0 \approx 0$ 와 같이 되려 할 것이다. 실제 까끄라기의 경우 두께는 약 40 μm 정도이고, 폭은 500 μm

정도 이므로, 충분히 넓다고 가정 할 수 있다. 따라서 까끄라기의 탄성 에너지는 벤딩에너지에 큰 영향을 받게 되며, 벤딩에너지를 최소화시키기 위해 실제 스트레인 값은 앞서 구한 스트레인과 거의 같아지게 된다. [16]

실제 까끄라기의 곡률 텐서는 κ_0 와 다른 값을 가지게 되는데, 실제 곡률을 구하기 위해선 Theorema egregium이용하여 구할 수 있다. 가우스 곡률은 다음과 같이 나타내어진다.

$$G = -\frac{1}{E}(\Gamma_{12,1}^2 - \Gamma_{11,2}^2 + \Gamma_{12}^1 \Gamma_{11}^2 - \Gamma_{11}^1 \Gamma_{12}^2 + \Gamma_{12}^2 \Gamma_{12}^2 - \Gamma_{11}^2 \Gamma_{22}^2) \quad (3.4)$$

여기서 Γ 는 제2종 크리스토펬 기호이다. 그런데 실제 스트레인이 ϵ_0 와 같으므로 u, v에 대한 미분값은 언제나 0이 된다. 따라서 모든 Γ 는 0이 되므로 가우스 곡률 또한 0이 된다. 가우스 곡률은 두 주 곡률의 곱과 같기 때문에 한 곡률값은 필연적으로 0이 되어야 한다. 또한, 멤브레인 에너지를 최소화하기 위해선 0이 아닌 나머지 주 곡률은 앞서 구한 κ_0 의 한 성분과 값이 같아져야 한다. 만약 두 주 곡률 값이 다르다면 실제 모델은 둘 중 큰 값을 가지게 된다. 이때, $\kappa_1 > \kappa_2$ 이므로 실제 곡률 텐서는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$b^* = \begin{bmatrix} \kappa_1 & 0 \\ 0 & \kappa_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \kappa_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

만약 까끄라기 세포를 감고 있는 셀룰로오스 섬유가 단순한 나선형으로 되어있다면, 곡률 b 와 곡률 b^* 는 같은 방향이므로 굽힘 방향은 주축 방향이 되어 단순한 굽힘 운동이 일어나게 된다. 하지만 Pelargonium속의 씨앗

까끄라기 세포는 셀룰로오스 섬유가 단순 나선형이 아닌 tilted 된 형태로 감겨 있다. [11] 이때의 tilted angle을 ψ 라 두면, 두 부분으로 나눈 활성층에서의 MFA는 각각 $\bar{\theta}_1 = \theta - \psi$ 와 $\bar{\theta}_2 = -\theta - \psi$ 로 나타낼 수 있다. 비활성층은 등방적 성질을 가진다고 보면, 실제 까끄라기를 모델링 하려면 세 층이 접합된 층의 전체 곡률 텐서인 식 (3. 7)를 ψ 만큼 회전시킨 곡률 값으로 구해야 한다.

$$b_\psi = R_\psi b^* R_\psi^T = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$R_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}$$

일반적으로 면의 가우스 곡률이 0이고, 곡률 성분이 모두 0이 아니면 나선형 형상을 만들어낸다. [16] 이때의 곡면 식은 다음과 같다.

$$U(u,v) = \frac{1}{\beta^2} \begin{bmatrix} k \cos(\beta u - \frac{\tau\beta}{k} v) \\ k \sin(\beta u - \frac{\tau\beta}{k} v) \\ \tau\beta u + k\beta v \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

이때 나선 리본의 반경 R 과 피치 P 는 다음과 같다.

$$R = 1/\kappa_1, \quad P = 2\pi \tan \psi / \kappa_1 \quad (3.11)$$

까끄라기의 MFA 값은 70° 이며, tilted angle은 20° , 흡습팽창률은 셀룰로오스 섬유 방향은 0.003이고, 수직 방향은 0.3이다. 활성층과 비활성층 전체 높이는 모두 $40\mu\text{m}$ 이다. Fig. 3.2 와 같이 이론 모델과 실제 까끄라기를 각 RH에 따라 비교해보았으며, 대체로 잘 맞음을 알 수 있었다.

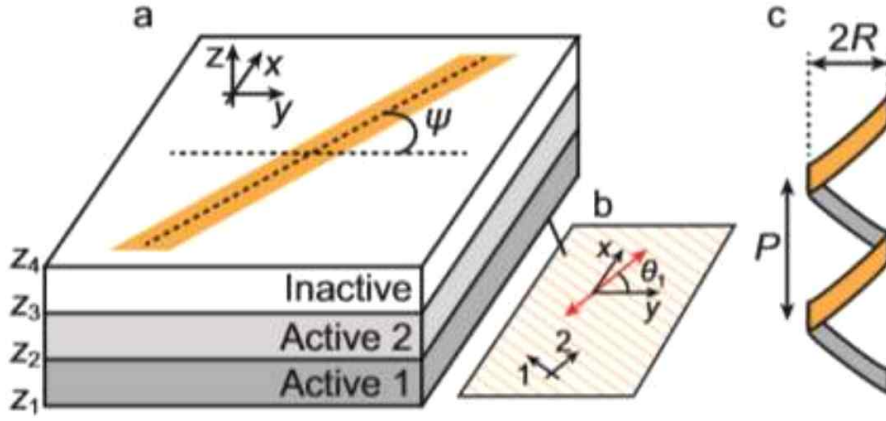


Fig. 3.1. Laminated plate model. (a) Schematics of the tri-layer plates (b) Orientation of the properties of anisotropic materials. Numbers 1 and 2 correspond to material coordinates. Red arrows of the first active layer indicates the expansion direction. (b) Geometry of helix

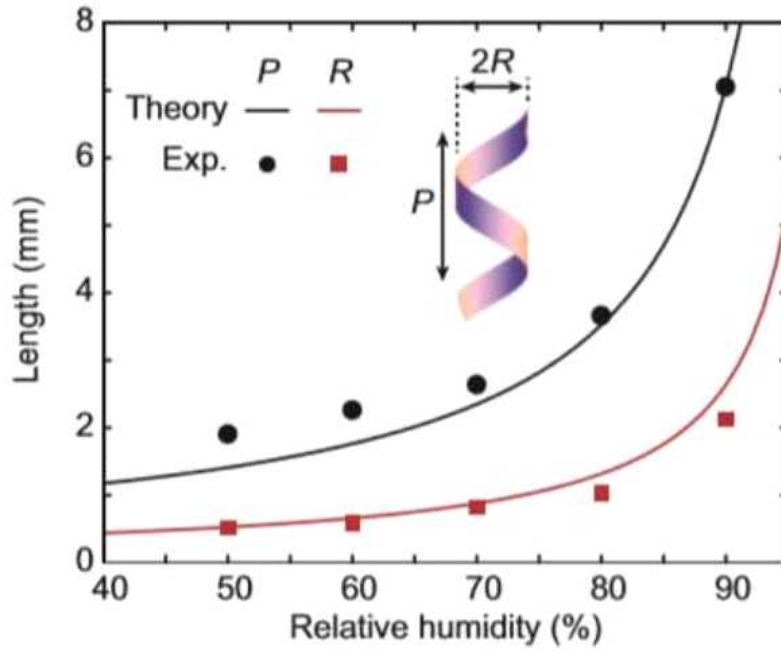


Fig. 3.2. Comparison between theoretical modeling and experimental measurements of the awns for various RH.

4. 나선 액추에이터

4.1 나선 액추에이터 제작

우리는 이방성 까끄라기의 구조적 특징의 이론을 바탕으로 흡습반응성 다공성 시트를 제작하였다. [17, 18] 모세관 바늘 팁에 매달려있는 폴리머 용액 방울에 강한 전기장을 가하면 나노 제트가 뽑아지고 회전식 수집기에 고체상으로 증착된다. Fig. 4.1은 실험 세팅의 개략도이다. 바늘에서부터 배출된 나노섬유는 굽힘 불안정성(bending instability)으로 인해 강한 휘핑 운동이 일어나지만, 드럼 컬렉터(collector)의 빠른 회전 속도는 나노섬유를 정렬시킬 수 있다 [19]. 회전자(rotator) 속도, 컬렉터와 니들 팁 사이의 거리 및 전압과 같은 실험 조건에 따라 미세 구조(다공성 정도, 기공 크기 및 나노섬유 두께)를 조정할 수 있다. 본 실험에서 우리는 10 wt % polyethylene oxide(PEO, 점도 평균 분자량 300,000 g / mol, Sigma Aldrich) 용액을 사용하였고, 회전 속도와 용액의 유량 및 전압은 각각 950 rpm, 1 ml / hr 및 10kV이다. 25G 바늘 끝과 9cm 직경의 드럼 사이의 거리는 15cm이다. 3시간 동안 전기 방사한 후 회전 수집기에서 정렬된 나노섬유로 이루어진 활성층을 분리 한 다음 비활성 층 (PI 테이프)을 활성층에 부착하였다. Fig. 4.2에서 적색 선 방향으로 이중층 레이어를 각도 ψ 로 절단하였다. 흡습성 이중층 스트립은 각도 ψ 를 갖는 방향성 나노섬유와 인해 이방성 팽창을 가지며, 이는 나선형 변형을 초래한다 (Fig. 4.3).

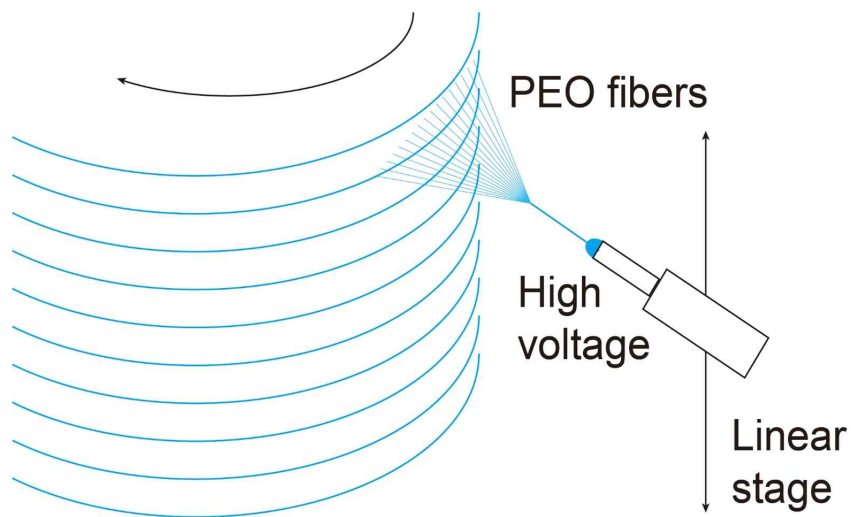


Fig. 4.1 Experimental apparatus to large-scaled directional electrospinning. Electrospun nanofibers deposited to the rotational collector in a solid phase

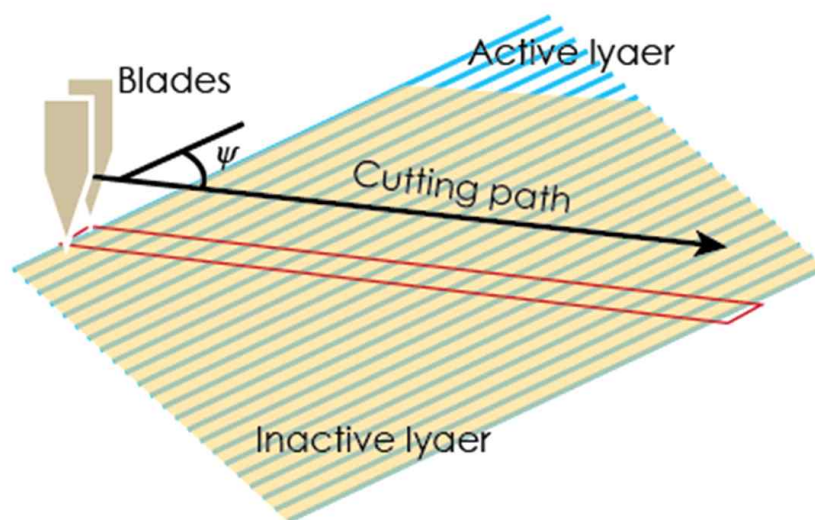


Fig. 4.2 Bilayer structure composed of inactive and active layers. The angle ψ corresponds to the cutting direction of the bilayer

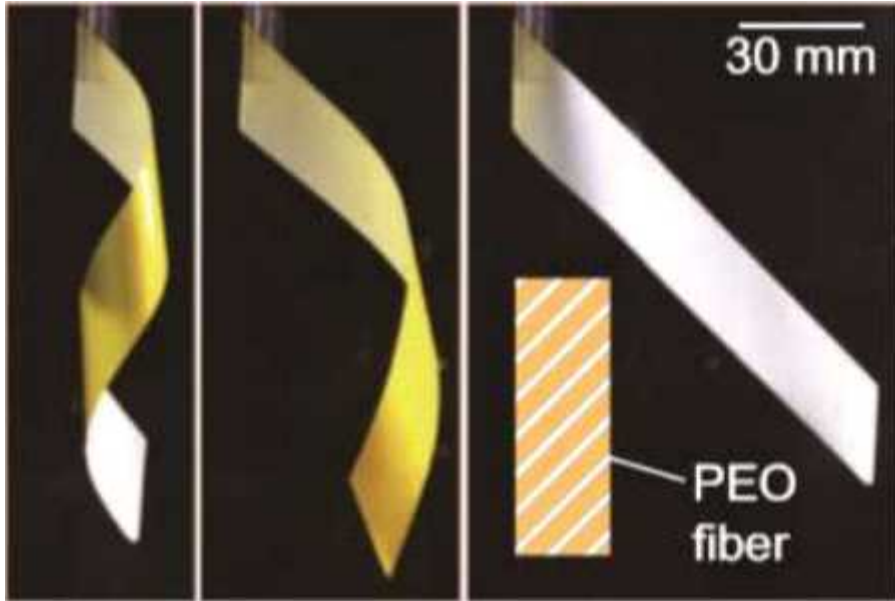


Fig. 4.3 Helical motion of the hygroscopic actuator with $\psi = 45^\circ$. RH is increasing from left to right.

4.2 나선 액추에이터 분석

나선 액추에이터의 흡습 변형율을 environmental SEM (ESEM) 장비를 이용하여 나노섬유의 흡습 팽창을 측정하였다. PEO는 흡습성 팽창 물질이며 벌크 PEO의 경우 섬유 배열상태가 랜덤하기 때문에 등방성 팽창이 일어난다. 그러나 벌크가 아닌 매우 긴 원통, 원뿔 및 타원과 같은 높은 종횡비를 가지는 구조로 적층시 PEO 섬유들이 랜덤하지 않은 배열구조로 적층되어 이방성 흡습 팽창이 일어나게 된다. 나노섬유의 팽창은 Fig. 4.4 에서 관찰할 수 있다. 섬유 방향 및 섬유에 대한 수직 방향의 변형 크기는 각각 0.29 및 0.03이며, 이를 토대로 이방성 다공성 시트는 섬유 배열 방향으로 거의 팽창한다고 가정할 수 있다 (Fig. 4.4의 황색 직선 참조). 적층된 나노섬유의 직경은 350nm이다 [19].

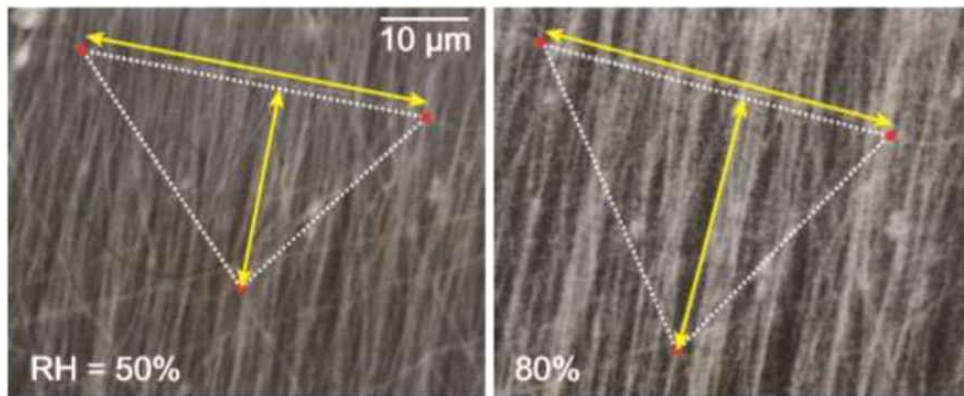


Fig. 4.4 ESEM images of the top view of the active layer. The fibers start to expand in fiber direction when the RH exceeds 40%. White dashed triangle indicates anisotropic areal expansion. Scale bar, 10 μm .

5. 이론과 나선 액추에이터 비교

우리는 나선 구조의 수치 모델을 재현하고 실제 모델과 비교한 후 이 이론을 토대로 액추에이터 모양을 제작하였다. Fig. 5.1과 같이, 수치 시뮬레이션으로 재현된 나선 형상은 다양한 tilted angle에 대한 나선 액추에이터의 형태와 잘 일치하였다. $\psi = 0^\circ$ 일 때, 흡습성 변형의 방향이 정확히 u 방향과 동일하기 때문에 액추에이터 동작이 나선형 코일링이 아닌 굽힘이 된다. 반면, $\psi = 90^\circ$ 일 때, 나노 섬유는 v 방향으로만 주로 팽창이 일어나므로 액추에이터는 u 방향으로의 변형이 거의 없다. 반면 ψ 의 값과 상관없이 R 은 거의 일정한 값을 유지하며, P 는 ψ 에 의존적 값을 보여준다.

κ_0 이 주어졌다면, 반경이 $1/\kappa_0$ 인 가상의 실린더를 ψ 각도로 따라 자르는 것과 같다고 볼 수 있다. Fig.5.2의 inset에서 볼 수 있듯이 실린더 표면에 ψ 각도를 이루는 사선을 그릴 수 있을 것이다. 이때, 사선의 형태는 R 이 일정하더라도 ψ 가 변함에 따라 형태가 변할 것이다. 실험에서 어떠한 ψ 값에 대해서도 반지름은 5.7 ± 0.16 mm를 유지하였다. Fig. 5b는 이론이 실험 결과와 잘 맞음을 보여준다. ψ 가 점차 증가함에 따라 P/R 은 증가한다.

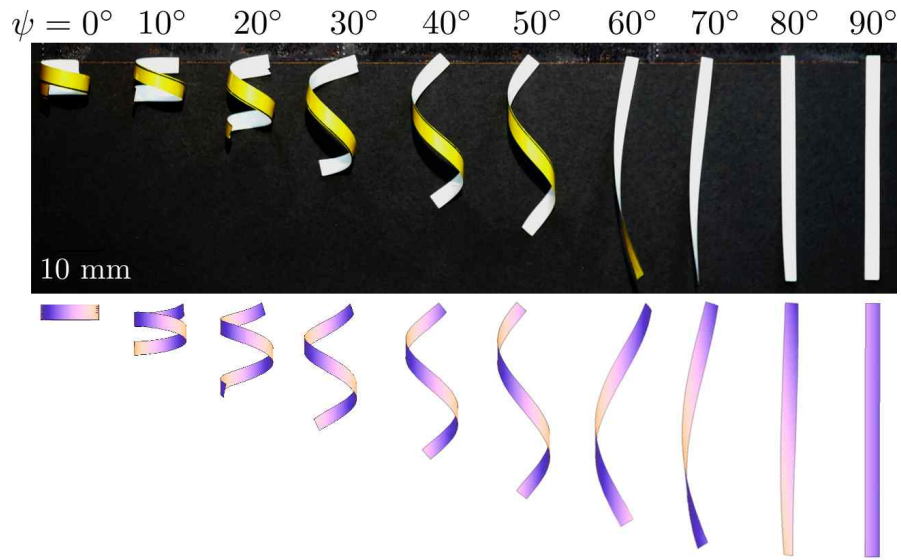


Fig. 5.1 Comparison between the actuators (top) and numerical simulation (bottom). Inset: Coordinates of the parametric curves of the helix.

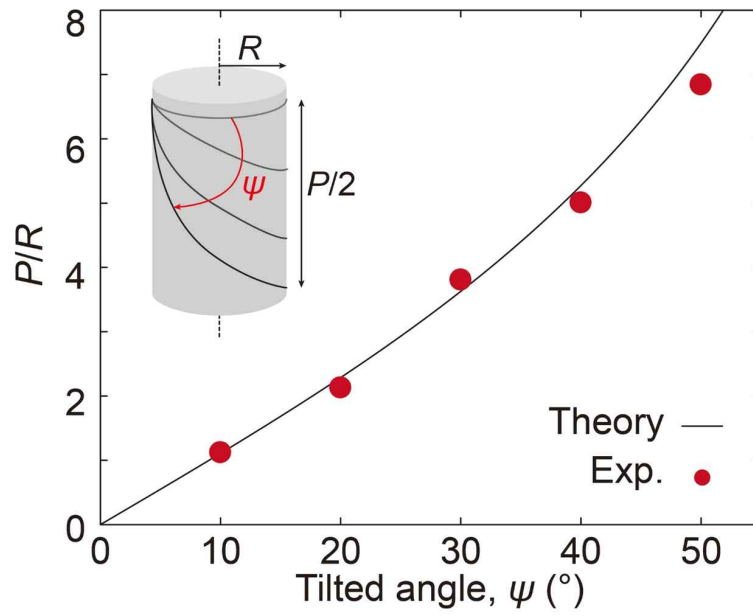


Fig. 5.2 Dimensionless length P/R of the actuators versus ψ . Inset: The characteristics of helix geometry.

6. 결론

본 연구에서 우리는 이방성 적층 판의 나선형 변형의 수학적 모델을 구성하였다. 까끄라기의 2 중층 구조(활성층과 비 활성층)를 해석적 편이를 위해 우리는 3 중층(2개의 활성층과 비 활성층)으로 구성된 적층 판으로 모델링 하였다. 활성층은 경사진 셀룰로오스 섬유에 의해 감겨진 흡습성 세포들이 일정하게 배열되어있는 층이며, 이는 방향성 팽창을 일으킨다. 나선형 모핑의 메커니즘은 두 개의 활성층의 다른 팽창 방향에 의해 일어난다.

또한, 이론적 모델링을 토대로 전기 방사로 제작된 흡습성 나선 액추에이터를 제작하였다. 나노섬유가 정렬되어있는 다공성 시트는 흡습 과정을 통해 섬유 방향으로 팽창을 일으켜, *Pelargonium* 씨앗 까끄라기와 같은 나선형 운동을 수행한다. 이론적 모델링을 실제 까끄라기의 변형과 비교하였으며, 이는 잘 일치하였다. 이는 식물의 복잡한 구조를 단순화시킨 모델로도 대체할 수 있음을 보여주며, 이 연구는 생물체의 움직임을 모사하는 다양한 연구에 이론적 틀을 구축하였으며, 식물들의 복잡한 구조물의 운동학뿐 아니라 동역학적 해석도 쉽게 이를 수 있을 것이다.

참고문헌

1. J. Dumais and Y. Forterre “Vegetable dynamicks: the role of water in plant movements” *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, vol. 44, pp. 453-478.
2. C. Dawson, J. F. Vincent and A. M. Rocca, “How pine cones open,” *Nature* 1997, vol. 390, p. 668.
3. Y. Forterre, J. M. Skotheim, J. Dumais and L. Mahadevan, “How the Venus flytrap snaps,” *Nature*, 2005, vol. 433 pp. 421-425.
4. R. Nathan, F. M. Schurr, O. Spiegel, O. Steinitz, A. Trakhtenbrot, and A. Tsoar “Mechanisms of long-distance seed dispersal,” *Trends in Ecology & Evolution*, .2008, vol. 23, pp. 638-647.
5. D. Evangelista, S. Hotton, and J. Dumais, “The mechanics of explosive dispersal and self-burial in the seeds of the filaree, *Erodium cicutarium* (Geraniaceae),” *Journal of Experimental Biology*, 2011, vol. 214, pp. 521-529.
6. W. Jung, W. Kim and H.-Y. Kim, “Self-burial mechanics of hygroscopically responsive awns,” *Integrative and comparative biology*, 2014, vol. 54, pp. 1034-1042.

7. W. Jung, S. M. Choi, W. Kim and H.-Y. Kim, "Reduction of granular drag inspired by self-burrowing rotary seeds," *Physics of Fluids*, 2017, vol. 29, p. 041702.
8. R. Elbaum and Y. Abraham, "Insights into the microstructures of hygroscopic movement in plant seed dispersal," *Plant Science*, 2014, vol. 223, p. 124-133.
9. Y. Abraham, C. Tamburu, E. Klein, J. W. Dunlop, P. Fratzl, U. Raviv and R. Elbaum, "Tilted cellulose arrangement as a novel mechanism for hygroscopic coiling in the stork's bill awn," *Journal of the Royal Society Interface*, 2012, vol. 9, pp. 640-647.
10. Y. Abraham and R. Elbaum, "Quantification of microfibril angle in secondary cell walls at subcellular resolution by means of polarized light microscopy," *New Phytologist*, 2013, vol. 197, pp. 1012-1019.
11. Y. Abraham and R. Elbaum, "Hygroscopic movements in Geraniaceae: the structural variations that are responsible for coiling or bending," *New Phytologist*, 2013, vol. 199, pp. 584-594.
12. H. Aharoni, Y. Abraham, R. Elbaum, E. Sharon and R. Kupferman, "Emergence of Spontaneous Twist and Curvature in Non-Euclidean Rods: Application to Erodium Plant Cells," *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, p. 238106.

13. J. R. Barnett and V. A. Bonham, "Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres," *Biological reviews*, 2004, vol. 79, pp. 461-472.
14. RE Mark, J Borch, MB Lyne and C Habeger, "Handbook of physical testing of paper," Marcel , Crc Press, 2002.
15. B Madsen, EK Gamstedt, "Wood versus plant fibers: similarities and differences in composite applications," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 2013, 564346.
16. S. Armon, E. Efrati, R. Kupferman and E. Sharon, "Geometry and mechanics in the opening of chiral seed pods," *Science*, 2011, vol. 333, pp. 1726-1730.
17. H.-Y. Kim, M. Lee, K. J. Park, S. Kim and L. Mahadevan, "Nanopottery: coiling of electrospun polymer nanofibers," *Nano letters*, 2010, vol. 10, pp. 2138-2140.
18. M. Lee and H.-Y. Kim, "Toward nanoscale three-dimensional printing: Nanowalls built of electrospun nanofibers," *Langmuir*, 2014, vol. 30, pp. 1210-1214.
19. B. Shin, J. Ha, M. Lee, K. Park, G. H. Park, T. H. Choi, K.-J. Cho and H.-Y., "Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?," *Advanced materials*, 2004, vol. 16, pp. 1151-1170.

Abstract

Helical morphing of hygroresponsive awns of *Pelargonium*

Sungmok Choi

Department of Mechanical and Aerospace Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Pelargonium seed, which has a helix configuration, is a common example of self-burrowing creatures in the botanical world. Since the seed awns are the unidirectional hygroexpansive materials, they deform helically, which allows them to reduce the granular drag of the digging the ground. Despite intensive study of helical deformation, the whole shape of helix of Pelargonium seed awn has not been treated. Here, we develop a simplified model, which was experimentally verified, to predict the helix shape of the seed awn. In addition, we fabricate the hygroresponsive helical actuators by electrospinning to mimic the botanical motion. We anticipate our work will shed light on the physics of helical motion of the seed awns and provide essential design parameters of tunable helical motion actuator.

Keywords: Hygroresponsive cell, helical motions, *Pelargonium* seed awn

Student number: 2014-21851